

Эффективность и проблемы энергосберегающих технологий цементного бетона

Э.И. БАТЯНОВСКИЙ, доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой «Строительные материалы и изделия» Белорусского национального технического университета; Е.А. ИВАНОВА, инженер, заведующая лабораторией ОДО «МЭТРАС»; Р.Ф. ОСОС, инженер, старший научный сотрудник НИИЛ модифицированного бетона и строительной продукции Белорусского национального технического университета

Часть 1

Изложены результаты исследований и производственно-го внедрения снижающих расход энергии технологий цементного бетона в строительной отрасли Беларуси, рассмотрены основные проблемы и направления их решения с целью снижения энергоемкости строительства.

Нараставшие с началом 1990-х гг. кризисные явления в энергообеспечении народного хозяйства Беларуси поставили перед его строительной отраслью задачу резкого снижения энергопотребления. Учитывая значительные объемы использования цементного бетона в современном строительстве и перспективность его применения как конструкционного материала в дальнейшем, особую значимость приобрела разработка энергосберегающих технологий в производстве сборных изделий и при устройстве (возведении) монолитных конструкций из бетона и железобетона. С 1994–1995 гг. такие технологии стали активно внедряться в строительной отрасли республики. Их можно условно разделить на два типа: «пассивные» (беспрогревные) и «активные» (малоэнергоемкие).

При реализации беспрогревной технологии отсутствует подвод тепла к бетону от внешних искусственных источников, а ускорение его твердения (т. е. повышение темпа роста прочности) обеспечивается за счет применения соответствующих химических добавок и аккумуляции теплоты, выделяемой при гидратации цемента (экзотермии). Малоэнергоемкие технологии характеризуются наличием периода подъема температуры с разогревом бетона до 30–50 °С, а в дальнейшем требуемый режим твердения поддерживается благодаря экзотермии цемента.

Результаты исследований, выполненных на кафедре «Строительные материалы и изделия» Белорусского национального технического университета (БИТУ) и в ее научно-исследовательской лаборатории модифицированного бетона, а также анализ опыта их внедрения с 1995 г. и использования в виде энергосберегающих технологий в строительной отрасли свидетельствуют, что в летний период по варианту беспрогревной технологии за 18–24 часов твердения бетона прочность его достигает 50 % от проектной. Таким образом, обеспечиваются условия бездефектной распалубки не только монолитных конструкций, но и сборных изделий, армированных ненапрягаемой арматурой. За 36–48 часов твердения достигается прочность бетона 70–80 % от проектной, что обеспечивает требуемые условия бездефектной распалубки сборных изделий с напрягаемой арматурой и снятие опалубки возводимых (устраиваемых) монолитных строительных конструкций, включая монолитные перекрытия зданий и сооружений.

Использование малоэнергоемкой технологии позволяет за 14–18 часов твердения бетона с начальным разогревом достичь прочности на уровне 70–80 % от проектной с затратами тепловой энергии при изготовлении сборных изделий примерно 125 000–250 000 кДж (0,03–0,06 Гкал) на 1 м³ бетона, а при бетонировании монолитным способом, например с использова-

нием электродного прогрева, – до 125 000 кДж (до 0,03 Гкал или 35 кВт·час.), в зависимости от условий ведения работ.

Приведенные данные подтверждены практикой строительства других организаций (объектов), в частности:

- практикой работы по беспрогревной технологии при производстве сборных изделий на заводе ЖБИ № 7 (г. Могилев) и ее малоэнергоемким вариантом на заводе пустотных изделий ОАО «Минскжелезобетон» (г. Минск) и других предприятий Беларуси;
- при круглогодичном ведении бетонных работ монолитным способом:
- МПМК № 198 (г. Логойск) – возведение фундаментов крытой автостоянки «Комаровского» рынка и ряда объектов в г. Минске;
- ЗАО «Славянский строитель» – возведение несущих внутренних стен и перекрытий 18-этажного здания из монолитного бетона в г. Санкт-Петербурге.

Реализация энергосберегающих технологий, с наибольшей эффективностью оцениваемых снижением энергетических, финансовых затрат и ускоренным оборотом бортооснастки (опалубки), требует соблюдения ряда условий, связанных с выбором цемента, соответствующих цели применения химических добавок [1–3], связанных с созданием температурного режима твердения бетона и разрешением других проблем, рассмотренных в публикациях [4–6] и в настоящей статье.

Фактор качества цемента

Снизить энергетические затраты при тепловой обработке или прогреве бетона можно при использовании всех применяемых разновидностей портландцемента (1, 2 и 3 групп эффективности при пропаривании), а также шлакопортландцемента и пуццоланового цемента. Однако наибольшую эффективность обеспечивают вяжущие, которые по минералогическому составу могут быть отнесены к цементам алито-алюминатной группы, т. е. при суммарном содержании $C_3S + C_3A \geq 60\%$. В таблице 1, в которой приведены характеристики цементов отечественных заводов (получены по усредненным данным лабораторий этих предприятий за период с 1995 по 2000 гг.), к алито-алюминатной группе могут быть отнесены вяжущие позиций 1, 2, 6 и 8 (последнее в исследованиях получено домолом цемента М500-Д0, поз. 6). Эти вяжущие обладают наибольшей экзотермией, так как удельная теплота гидратации клинкерных минералов за первые 3 суток составляет в кДж/кг для: $C_3A \sim 592$; $C_3S \sim 407$; $C_4AF \sim 186$; $C_2S \sim 63$ [7].

В результате, как это будет показано далее, бетон, приготовленный на вяжущих с высоким содержанием C_3S и C_3A , в большей степени проявляет эффект саморазогрева при твердении как по беспрогревной, так и по малоэнергоемкой технологии.

При неизвестном минералогическом составе цемента его ожидаемую эффективность можно оценить по косвенной характеристике – группе эффективности при пропаривании. Из дан-

ных, приведенных в таблице 1, следует, что цементы алито-алюминатной группы (поз. 1, 2, 6 и 8) соответствуют 1 группе эффективности при пропаривании. По существу, аналогичную характеристику вяжущему дают данные по прочности в возрасте 2 суток, полученные (или приведенные в сертификате на цемент) по СТБ ЕН 197-1-2000, так как повышенный темп роста прочности (при устойчивой удельной поверхности 2800–3000 г/см² по прибору типа «ПСХ») непосредственно зависит от минералогического состава клинкера в цементе.

Следует отметить закономерность взаимосвязи «гидратация цемента – тепловыделение», заключающуюся в том, что с повышением температуры бетона (за счет саморазогрева или прогрева от внешних источников) процесс гидратации цемента ускоряется и растет количество выделяемой им теплоты. Этот эффект усиливается при введении в бетон химических добавок – ускорителей твердения: сульфата натрия Na₂SO₄, нитрата кальция Ca(NO₃)₂, нитрит-нитрата кальция Ca(NO₂)₂+Ca(NO₃)₂, хлористого кальция CaCl₂ [3] и других хлоридосодержащих добавок: ПВК, РС, СХП, галитовых отходов и пр.

Роль химических добавок в бетон

С позиций энергосбережения в производстве сборного железобетона и строительства из монолитного бетона при минимальных финансовых затратах на добавки достаточно эффективно использовать моноподобку ускорителя твердения. Наибольший же эффект снижения энергетических затрат на прогрев бетона (для ускорения его твердения) обеспечивают комплексные добавки, содержащие ускоритель твердения и пластифицирующую добавку 1 группы (суперпластификатор) [3], по качественным характеристикам не уступающую уровню разжижителя С-3. В этом случае, за счет снижения начального водосодержания бетона (при сохранении требуемой по условиям работ формуемости смеси) и воздействия ускорителя твердения обеспечивается не только снижение энергетических затрат на прогрев бетона, но и рост его прочностных и эксплуатационных характеристик, основывающихся на повышении плотности и непроницаемости цементного камня и бетона в целом. Пластифицирующие добавки 2, 3 и 4 групп, являясь менее качественными (такие как модифи-

цированные лигносульфонаты, а также ЛСТ и др.), снижают энергосберегающую эффективность комплексной добавки вследствие рассмотренных далее особенностей механизма их воздействия на гидратацию цемента и кинетику роста прочности бетона.

Добавки-ускорители твердения. Механизм воздействия химических добавок-ускорителей твердения на процессы гидратации, схватывания и твердения цемента представляет собой комплекс физико-химических явлений [1, 8–12], в результате которых возрастает темп и сокращается время перехода цементного теста из вязко-пластичного в камневидное состояние, повышаются плотность и прочность цементного камня и бетона в целом. Такие добавки являются электролитами и в водной среде образуют истинные растворы, распадаясь на составляющие ионы. Обладая значительным энергетическим потенциалом, ионы вещества добавки способны проникать с молекулами воды в адсорбционные слои жидкости, в зону ее контакта с поверхностью вяжущего. Вследствие значительно большего, чем у молекул воды, собственного энергетического поля, присутствие таких ионов приводит к росту сил, обеспечивающих растворение (гидратацию) клинкерных минералов с повышением интенсивности протекания этого процесса.

К аналогичному результату приводит явление частичного связывания веществом добавки продуктов гидратации цемента: гидроокиси кальция, гидроалюминатов и гидроферритов, что также ускоряет процесс растворения. Кроме того, эффект проявляется в углублении явления дезагрегации (пептизации) цементных флоккул. Присутствие в воде ионов электролита значительно повышает усилие отталкивания одноименно заряженных пленок жидкости адсорбированной поверхностью зерен цемента, составляющих флокулу, что проявляется в интенсивности развития процесса их распада и, как следствие, сопровождается вовлечением в реакцию с водой дополнительной поверхности вяжущего, способствует росту плотности и прочности цементного камня (бетона).

С течением времени, на фоне углубления процесса гидратации цемента и накопления продуктов гидролиза в жидкой фазе, развиваются химические реакции с веществом добавок, сопровождающиеся образованием новых соединений. В результате образуются вторичные (двойные) соли, уплотняющие коагуляционную структуру цементного геля, а в конечном итоге – цементного камня и бетона.

Несколько иначе проявляется механизм воздействия на гидратирующийся и твердеющий цемент добавок-затравок, представляющих собой тонкодисперсную твердую фазу, являющуюся подложкой, инициирующей ускорение образования новых фаз в цементном геле за счет снижения энергетического порога начала образования кристаллогидратов. Эффект применения данного типа добавок (например, микрокремнезема) основывается на том, что образование и формирование новых фаз из водного раствора продуктов гидратации цемента является энергетически невыгодным (затратным) процессом. Его развитие может быть инициировано введением готовых «центров» кристаллизации, обладающих средством по отношению к реагирующему с водой вяжущему веществу. В результате вокруг «центров» кристаллизации с меньшими потерями энергии в системе «цемент – вода» формируются гидрокристаллы клинкерных минералов, что способствует ускоренному росту прочности бетона.

Таблица 1

Характеристика цементов										
Завод-изготовитель	Марка	Активность, МПа	Группа эффективности при пропаривании	Минералогический состав, %				K _{нр}	Сроки схватывания, час:мин	
				C ₃ S	C ₃ A	C ₂ S	C ₄ AF		Начало	Конец
БЦЗ	M500-Д0	53	1	62	6,5	15	11,5	0,255	2:05	3:10
БЦЗ	M400-Д0	43	1	56	7,3	18	13	0,265	2:10	3:20
Кричевцемент-ношифер	M500-Д0	48	2	54	5,0	21	16	0,26	3:15	3:55
Кричевцемент-ношифер	M400-Д0	42	3	51	4,5	26	15	0,27	3:20	5:10
Красносельск-стройматериалы	M500-Д0	49	2	53	2,3	23	15,7	0,25	2:35	3:53
Красносельск-стройматериалы	M500-Д0	51	1	55	4,7	20	15	0,255	2:05	3:17
Красносельск-стройматериалы	M400-Д0	42	2	52	3,8	22	17,5	0,265	2:30	3:40
Красносельск-стройматериалы	M550-Д0	56	1	55	4,7	20	15	0,265	1:40	2:30

Пластифицирующие добавки. Существенное отличие добавок-пластификаторов, содержащих поверхностно-активные вещества (ПАВ), от добавок-ускорителей твердения – заключается в замедлении реакций гидратации цемента на начальной стадии взаимодействия его с водой, что сопровождается увеличением сроков схватывания пластифицированной цементоводной системы и замедлением процессов, подготавливающих и обеспечивающих твердение вяжущего, т. е. рост прочности бетона. Связано это со следующими причинами.

По определению и состоянию водных растворов химических веществ, относящихся к поверхностно-активным [12, 13], концентрация молекул ПАВ всегда выше у поверхности раздела фаз «жидкость – твердое тело» или «жидкость – газообразная среда», чем в объеме раствора. В системе «цемент – вода», т. е. в цементном тесте, поверхность раздела твердой и жидкой фаз проходит по поверхности флоккул вяжущего, обладающей огромным избыточным потенциалом, который стремится к самоликвидации при контакте с водой в форме образующейся вокруг частиц сольватной водной оболочки.

Как известно, потенциал поверхности распределен не равномерно и обладает явно выраженными участками его превышения – активными центрами поверхности. Для частиц измельченного клинкера это могут быть как особенности (выступы, разломы) поверхности, так и «выходы» на поверхность молекул наиболее активного клинкерного минерала – трехкальциевого алюмината C_3A . Благодаря повышенному энергетическому потенциалу активные центры гидратируются прежде всего, т. е. взаимодействуют с водой в обычных условиях, а при наличии в ней ПАВ именно к ним перемещаются его молекулы и, в первую очередь, адсорбируются у этих участков поверхности зерен цемента.

Результатом адсорбции крупных молекул ПАВ является частичная блокировка электростатического потенциала поверхности, вследствие которой уменьшается толщина слоя жидкой фазы, удерживаемого частицами (флокулами) вяжущих в отсутствие ПАВ. Таким образом, значительная часть воды перейдет из связанного в свободное состояние, что и обуславливает первоначально эффект пластификации. При этом чем значительнее уровень блокировки электростатического потенциала поверхности (либо за счет активности молекул ПАВ – качество добавки, либо за счет их количества – величина дозировки), тем значительнее эффект пластификации. Одновременно проявляется побочный отрицательный эффект присутствия в системе «цемент – вода» молекул ПАВ, заключающийся в препятствии доступу молекул воды к поверхности цемента и соответствующем «торможении» процесса гидратации вяжущего и последующего твердения (т. е. роста прочности бетона). Особенно это характерно для рядовых пластификаторов, например ЛСТ, ЩСПК, мылонафта, ГКЖ и др. Поэтому для каждой пластифицирующей добавки существует вполне определенная область ее рационального дозирования [3], учитывающая обе означенные стороны эффекта адсорбции молекул ПАВ на поверхности вяжущего.

Библиографический список:

1. Ратинов В.Б., Розенберг Т.И. Добавки в бетон. М.: Стройиздат, 1989. 188 с.
2. Батраков В.Г. Модифицированные бетоны. М.: Стройиздат, 1990. 400 с.
3. П1-99 к СНиП 3.09.01-85. Применение добавок в бетоне. 33 с.
4. Батяновский Э.И., Осос Р.Ф. Технологические особенности производства ЖБИ с применением ускорителей твердения бетона. // Сб. статей I научно-методического межвузовского семинара. Минск, 1998. № 1. С. 22–25.
5. Батяновский Э.И., Осос Р.Ф. О кинетике твердения бетона с сульфатосодержащими добавками. / Материалы VIII Международного научно-практического семинара. Брест. 2001. № 1. С. 188–195.
6. Иванова Е.А., Батяновский Э.И. Особенности транспортирования бетонных смесей с химическими добавками / Сб. науч. трудов международного научно-методического межвузовского семинара. Могилев. 2005. С. 162–168.
7. Рояк СМ., Рояк ГС. Специальные цементы. М.: Стройиздат, 1983. 279 с.
8. Розенберг Т.И., Каплан А.С., Ямбор Я.Я. Механизм действия добавок-электролитов на структуру цементного камня и свойства бетона // Бетон и железобетон. 1977. № 7. С. 6–9.
9. Вавржин Ф., Крчма Р. Химические добавки в строительстве. М.: Стройиздат, 1964. 288 с.
10. Ахвердов И.Н., Шапимо М.А., Довнар Н.И. О влиянии хлористого кальция на формирование структуры цементного камня и бетона // Доклады АН БССР 1975. Т 19, № 17. С. 626–629.
11. Ахвердов И.Н., Батяновский Э.И. Быстротвердеющий бетон сухого формирования // Бетон и железобетон. 1986. № 11. С. 7–9.
12. Тейлор Х. Химия цемента // Пер. с англ. М.: МИР, 1996. 500 с.
13. Фридрихсберг Д.А. Курс коллоидной химии. Л.: Химия, 1984. 368 с.
14. СНиП 2.03.11-85. Защита строительных конструкций от коррозии.
15. СНиП 3.03.01-87. Несущие и ограждающие конструкции.
16. Европейский стандарт EN 206-1:2001.
17. Пособие по применению химических добавок при производстве сборных железобетонных конструкций и изделий (к СНиП 3.09.01-85) / НИИЖБ. М.: Стройиздат, 1989. 39 с.
18. СТБ 1168-99. Бетоны. Метод контроля коррозионного состояния стальной арматуры в бетоне и защитных свойств бетона.



«СТРОЙ УРАЛ»

ЭНЕРГО - И РЕСУРСОБЕРЕЖЕНИЕ

специализированная выставка

25-27

марта, 2009 г.
г. Оренбург



- Архитектура, градостроительство, стройиндустрия;
- Строительная техника и оборудование;
- Строительные, отделочные, кровельные материалы;
- Дорожное строительство;
- Элементы интерьера, домостроительство;
- Приборы, средства, системы учета энергоресурсов;
- Энергосберегающие конструкции, оборудование, технологии;
- Современные покрытия, утеплители, теплоизолирующие материалы.

Выставка состоится в
СКК «ОРЕНБУРЖЬЕ»
пр. Гагарина 21/1

ОАО «УралЭкспо»
 тел./факс: (3532) 99-69-39,
 99-69-40;
 e-mail: uralexpo@yandex.ru,
 www.uralexpo.ru